

# VERFAHREN ZUR WERKSTOFFABHAENGIGEN STEUERUNG VON WAERMEBEHANDLUNGSPROZESSEN VON METALLEN UND VORRICHTUNG DURCHFUEHRUNG DES VERFAHRENS

**Patent number:** DE3925047

**Publication date:** 1991-01-31

**Inventor:** BRAISCH PAUL DR ING (DE)

**Applicant:** BRAISCH PAUL DR ING (DE)

**Classification:**

- international: G01R19/00; G01R21/00; G01R23/00; G01R25/00;  
G06F15/46; H05B6/02

- european: C21D11/00; H05B6/06

**Application number:** DE19893925047 19890728

**Priority number(s):** DE19893925047 19890728

**Also published as:**



WO910209

EP0484359

EP0484359

**Report a data error**

## Abstract of **DE3925047**

A process is useful for controlling processes for heat treatment of metals in function of the material d inductive heating in a closed control circuit if otherwise, with predetermined and exactly reproducible machine parameters, the processing result is affected by the material properties subject to a random change. This could occur in particular as a result of a random change in the metallurgical transform behaviour, the electrical or magnetic properties and the like. The variation of the process control parameter(s) (temperature, heat output, and similar quantities) with time is analysed in real time and relation to the deviation from a predetermined function. The deviating material properties are derived the result. Any necessary correction of these control parameters is carried out during the current work cycle, so that each random change in the material properties is compensated and its influence on the processing result is limited.

---

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide

⑬ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift  
⑪ DE 3925047 A1

⑳ Aktenzeichen: P 39 25 047.4  
㉑ Anmeldetag: 28. 7. 89  
㉒ Offenlegungstag: 31. 1. 91

㉓ Int. Cl. 5:  
G06 F 15/46

H 05 B 6/02  
G 01 R 25/00  
G 01 R 21/00  
G 01 R 19/00  
G 01 R 23/00  
H 05 B 6/02

DE 3925047 A1

㉔ Anmelder:  
Braisch, Paul, Dr.-Ing., 6900 Heidelberg, DE  
  
㉕ Vertreter:  
Katscher, H., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 6100 Darmstadt

㉖ Erfinder:  
gleich Anmelder

㉗ Verfahren zur werkstoffabhängigen Steuerung von Wärmebehandlungsprozessen von Metallen und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens

Das Verfahren dient zur werkstoffabhängigen Steuerung von Wärmebehandlungsprozessen von Metallen bei induktiver Erwärmung in einem geschlossenen Regelkreis, wenn sonst bei vorgegebenen und genau reproduzierten Maschinenparametern das Bearbeitungsergebnis von den einer Zufallsänderung unterliegenden Werkstoffeigenschaften beeinflusst wird. Dies könnte insbesondere durch zufällige Veränderung des metallurgischen Umwandungsverhaltens, der elektrischen oder magnetischen Eigenschaften und ähnliches geschehen. Die zeitliche Veränderung der maßgeblichen Prozeßkenngröße oder Prozeßkenngrößen (Temperatur, Erwärmungsleistung und ähnliche Größen) wird in Echtzeit und in bezug auf die Abweichung gegenüber einer vorgegebenen Funktion analysiert. Daraus werden die abweichenden Werkstoffeigenschaften erkannt. Die eventuell notwendige Korrektur dieser maßgeblichen Kenngröße wird im noch laufenden Arbeitszyklus dergestalt vorgenommen, daß die zufällige Veränderung der Werkstoffeigenschaften jeweils kompensiert und deren Einfluß auf das Bearbeitungsergebnis eingeschränkt wird.

DE 3925047 A1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur werkstoffabhängigen Steuerung von Wärmebehandlungsprozessen von Metallen bei induktiver Erwärmung in einem geschlossenen Regelkreis, wenn sonst bei vorgegebenen und genau reproduzierten Maschinenparametern das Bearbeitungsergebnis von den einer Zufallsänderung unterliegenden Werkstoffeigenschaften beeinflusst wird, insbesondere durch zufällige Veränderung des metallurgischen Umwandlungsverhaltens, der elektrischen oder magnetischen Eigenschaften und ähnliches, sowie eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

Die erfolgreiche Anwendung zahlreicher Wärmebehandlungsverfahren hängt davon ab, daß alle den Behandlungsprozeß bestimmenden Bedingungen von Arbeitszyklus zu Arbeitszyklus konstant bleiben bzw. mit hoher Genauigkeit reproduziert werden. Dazu kann gehören, daß dann auch bestimmte Werkstoffeigenschaften, wie z. B. das Ausgangsgefüge der jeweils bearbeiteten Werkstücke, von Teil zu Teil konstant bleiben müssen bzw. in nur engen Toleranzen variieren dürfen. Eine solche Forderung wird insbesondere dann gestellt, wenn z. B. bei der induktiven Randschichthärtung die Härteergebnisse von den Härtebarkeitseigenschaften des Ausgangsmaterials abhängen.

Die technische Lehre und die praktische Erfahrung zeigt, daß veränderliche Gefügeeigenschaften beim induktiven Randschichthärten zu veränderlichen Umwandlungstemperaturen bzw. veränderlichen Randhärte-tiefen führt. Unter Bedingungen einer auf hohem Qualitätsstand durchgeführten Fertigung, mit einem nur engen Streuband für die Randhärte-tiefe, ist in der Praxis oft beobachtet worden, daß die zugelassene Streubreite nur deshalb überschritten wurde, weil das Härte-verhalten der behandelten Teile zufallsartig und über-mäßig streute.

Eine Möglichkeit der Forderung konstanter bzw. eingegatter Werkstoffeigenschaften des Ausgangsmaterials in der industriellen Praxis entgegenzukommen, besteht z. B. darin, daß die Werkstücke in getrennten Losen jeweils gleichen Ursprungs, z. B. aus einer gleichen Gießcharge, Walzcharge, Schmiedecharge usw., durch die Fertigung geschleust werden. Eine solche Vorgehensweise hat jedoch die Nachteile, daß die Lose über eine erhebliche Anzahl von unterschiedlichen Arbeitsgängen getrennt verfolgt werden müssen und daß bei jedem neuen Losanfang eine Neueinrichtung des Verfahrens notwendig ist. Beides ist mit erheblichen Kosten verbunden. Auch ist in Betracht zu ziehen, daß wegen menschlichen Versagens Vermischungen auftreten. Darüber hinaus, ist es eine in der industriellen Praxis bekannte Tatsache, daß die Streubreite der maßgeblichen Werkstoffeigenschaften schon innerhalb solcher Art zusammengestellter Lose oft so groß ist, daß die zugelassenen Bearbeitungstoleranzen nicht eingehalten werden können.

Es ist daher versucht worden, dem negativen Einfluß einer Zufallsänderung von Werkstoffeigenschaften auf das Bearbeitungsergebnis in einer Serienfertigung dadurch entgegenzutreten, daß an jedem einzelnen Werkstück eine automatische zerstörungsfreie Werkstoffanalyse durchgeführt und das Ergebnis der Analyse zur entsprechenden Prozeßsteuerung des nachfolgenden Bearbeitungszyklus verwendet wird. Zu diesem Zweck sind z. B. zur Ermittlung der chem. Zusammensetzung die Spektralanalyse oder zur Ermittlung der metallurgi-schen Ausgangsgefüge, Wirbelstrom-, mikromagneti-

sche oder Ultraschall-Meßverfahren eingesetzt worden. Solche Vorgehensweisen versagen jedoch prinzipiell, wenn die den Bearbeitungsprozeß beeinflussenden Werkstoffeigenschaften von der Ablaufgeschwindigkeit des Prozesses abhängen. So sind bei einer induktiven Erwärmung die genannten Vorgehensweisen z. B. nicht in der Lage, auf das von der Erwärmungsgeschwindigkeit abhängige metallurgische Umwandlungsverhalten des erwärmten Werkstückes bzw. Werkstoffes zu schließen. Daraus folgt, daß im Falle einer Wärmebehandlung mit Kurzzeitaustenitisierung und bei von Werkstück zu Werkstück zufallsartig schwankenden Werkstoffeigenschaften, das Bearbeitungsergebnis nicht mehr beherrscht werden kann.

Die Aufgabe der Erfindung besteht nun darin, ausgehend von dem aufgezeigten Stand der Technik, ein Verfahren anzugeben, das den Prozeß der induktiven Wärmebehandlung dergestalt steuert, daß das Behandlungsergebnis in einer Serienproduktion trotz einer Zufallsänderung von beliebigen Werkstoffeigenschaften nicht oder in nur engen Grenzen streut.

Die Lösung dieser Aufgabe wird durch die Beobachtung vermittelt, daß bei der induktiven Erwärmung die maßgeblichen elektrischen Prozeßkenngrößen  $P$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $\phi$  und  $f$  von den einschlägigen Werkstoffeigenschaften in spezifischer Weise beeinflusst werden. Die Lösung der Aufgabe stützt sich weiterhin auf die von der technischen Lehre vermittelten Gesetzmäßigkeiten, die den genannten spezifischen Beeinflussungen zugrunde liegen.

So ist bekannt, daß die Stromverteilung im Randbereich eines induktiv erwärmten Werkstückes sich in Abhängigkeit von der Temperaturverteilung und den metallurgischen Phasenzuständen kontinuierlich vom Beginn bis an das Ende der Erwärmung ändert. Es ist weiterhin bekannt, daß hierbei nicht nur die Temperatur, sondern auch die chem. Zusammensetzung, die Korngröße, die Gefügeart, die Steigerungen, die vorangegangenen Bearbeitungsgänge und weitere Faktoren eine Rolle spielen. Insbesondere ist bekannt, daß mit zunehmender Prozeß-(Erwärmungs-)geschwindigkeit die Gefügeart bzw. die Verteilung des Kohlenstoffs zu Prozeßbeginn den weiteren Prozeßablauf bestimmen.

Mit Hilfe einer schon mit Prozeßbeginn einsetzenden Analyse besagter Prozeßkenngrößen, ist es daher möglich, auf die jeweils vorliegenden Werkstoffeigenschaften zu schließen bzw. eine gegenüber einem bekannten Stand zufallsartige Veränderung betragsmäßig festzustellen. Daraus ergibt sich weiter die Möglichkeit, unmittelbar zu erkennen, ob mit den gegebenen Prozeßkenngrößen das erwünschte Bearbeitungsergebnis zu erreichen ist bzw., falls nicht, während des verbleibenden Zeitabschnittes bis zum Prozeßende die maßgeblichen Prozeßkenngrößen in geeigneter, d. h. in kompensatorischer Weise zu steuern. Die rechnerische Bestimmung des jeweils erforderlichen Ausmaßes der kompensatorischen Steuerung im Hinblick auf das Erreichen des erwünschten Ergebnisses, erfolgt auf dem Wege der empirischen Bestimmung der jeweils gültigen quantitativen Zusammenhänge zwischen bestimmten Werkstoffeigenschaften, davon beeinflussten Prozeßkenngrößen und Behandlungsergebnissen.

Es ist daher Gegenstand der Erfindung, daß besagte Analyse auf einen bekannten Prozeßablauf, der einem bekannten Werkstoffzustand und einem bekannten Bearbeitungsergebnis entspricht, Bezug nimmt.

Auch ist für die Erfindung kennzeichnend, daß sowohl besagte Analyse als auch besagte Steuerung in beliebiger

kurzen Zeitabschnitten, jeweils wechselnd, von Prozeßbeginn bis zu Prozeßende durchgeführt wird und damit alle Forderungen zum Aufbau eines geschlossenen Regelkreises erfüllt sind.

Weiterhin ist Gegenstand der Erfindung eine Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens.

Die nachstehende Beschreibung eines Ausführungsbeispiels der Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens dient im Zusammenhang mit beiliegenden Zeichnungen Fig. 1 bis 5 der weiteren Erläuterung.

Mit dem Bezugszeichen 3 ist ein Körper bezeichnet, der mit Hilfe einer Induktionsschleife 5 insgesamt oder in Teilbereichen auf Austenitisierungstemperatur gebracht wird, um z. B. anschließend abgeschreckt bzw. gehärtet zu werden. Zu diesem Zweck wird die Induktionsschleife 5 von einem Frequenzwandler 4 mit elektrischer Energie beliebiger Frequenz versorgt. Versorgungsstrom und Versorgungsspannung werden mit Hilfe des Spannungswandlers 1 bzw. des Stromwandlers 2 gemessen. Die entsprechenden Meßsignale werden von einem mehrkanaligen Meßwandler 6 aufgenommen und zur weiteren Verarbeitung zu einem der jeweils von der Heizschleife 5 verbrauchten Leistung P proportionalen Signal an den Rechner 7 weitergegeben. Die vom Rechner 7 errechnete zeitliche Funktion P(t) ist in ihrem prinzipiellen Verlauf in Fig. 2 dargestellt. Der Rechner 13 analysiert die Funktion P(t) mit einer geeigneten, dem jeweiligen Vorgang angepaßten Abfragefrequenz, und zwar in Verbindung mit einem Vorrat von Referenzfunktionen  $P_a(t)$  bis  $P_k(t)$ , die vom Speicher des Rechners 7 zur Verfügung gestellt werden.

Die Referenzfunktionen  $P_a(t)$  bis  $P_k(t)$  werden auf einfachste Weise in dem eigentlichen geregelten Zyklus  $n = i$  vorangehenden Einrichtzyklen  $n = a$  bis  $k$  empirisch bestimmt, nämlich durch Zeitaufnahme der maßgeblichen Prozeßkenngrößen von Prozeßzyklen, die jeweils zu einem befriedigenden Bearbeitungsergebnis geführt haben.

Die Analyse der jeweils aktuellen Funktion  $P_i(t)$  in bezug auf die Referenzfunktion  $P_b(t)$  durch den Rechner 7 beginnt, wie in Fig. 2 dargestellt, im Zeitpunkt  $t = 0$  und wird im angegebenen Beispiel bis zum Zeitpunkt  $t = t_x(i) < t_e$  fortgeführt.

Ziel dieser Analyse ist erfindungsgemäß, aufgrund bestimmter Kriterien charakteristische Unterschiede im Verlauf der beiden Funktionen  $P_i(t)$  und  $P_b(t)$  zu erkennen und diese bestimmten, den Prozeß der induktiven Wärmebehandlung beeinflussenden Faktoren zuzuordnen, z. B. Änderung der Härtebarkeitseigenschaften des erhitzten Werkstoffes, Änderung des Induktorzustandes u.ä.

Im folgenden wird ein Beispiel für ein Analysekriterium zur Erkennung veränderter Härtebarkeitseigenschaften beschrieben.

Der Rechner 7 ermittelt für vorgegebene Kontrollwerte  $P_{1u}$  und  $P_{2u}$  die zugeordneten Zeiten  $t_1(b)$  und  $t_2(b)$  für den gewählten Referenzzyklus  $n = b$  und die zugeordneten Zeiten  $t_1(i)$  und  $t_2(i)$  für den aktuellen, in Echtzeit zu korrigierenden Zyklus  $n = i$  (Fig. 2).

Anschließend errechnet der Rechner 7 den Betrag des Ausdrucks

$$\Delta t(i) = (((t_2(i) - t_2(b)) - (t_1(i) - t_1(b))) \quad (1)$$

Führt die Rechnung (1) zu einem Ergebnis

$$\Delta t(i) \neq 0, \quad (2)$$

bedeutet dies, daß das im Zyklus  $n = i$  induktiv erwärmte Werkstück gegenüber dem im Zyklus  $n = b$  erwärmten Werkstück abweichende Werkstoffeigenschaften bzw. Härtebarkeitseigenschaften aufweist. Letzteres bedeutet dann weiter, daß im Falle eines unkorrigierten weiteren Prozeßablaufes, das Härteergebnis wegen der festgestellten Abweichung außerhalb der vorgegebenen Toleranzen liegen wird.

Erfindungsgemäß kann letzteres dadurch vermieden werden, daß der Prozeßablauf bzw. die ursprüngliche Stellgröße  $S(i)$  ab dem Zeitpunkt  $t_x(i)$ , um den Betrag  $\Delta S(i)$  korrigiert wird, Fig. 3.

Den Korrekturbetrag  $\Delta S(i)$  errechnet der Rechner 7 aus einer Bestimmungsgleichung der Form

$$\Delta S(i) = f(\Delta t(i)). \quad (3)$$

Ein entsprechendes Korrektursignal wird vom Rechner 7 über die Steuerung 8 an den Frequenzwandler 4 weitergeleitet, nämlich dergestalt, daß die den Prozeßablauf bestimmende Kenngröße ab dem Zeitpunkt  $t_x(i)$  gegenüber einer unkorrigierten Situation  $P(i)$  nun verändert gemäß  $P(\text{korr}, i)$  verläuft und damit trotz der zufällig aufgetretenen Abweichung der Werkstoffeigenschaften, das Härteergebnis erfindungsgemäß in den vorgegebenen Toleranzen gehalten wird.

Die Bestimmungsgleichung (3) berücksichtigt die spezifischen metallurgischen, thermischen und geometrischen Bedingungen eines gegebenen Anwendungsfalles.

Auf einfache Weise läßt sich die Bestimmungsgleichung (3) auf empirischem Wege ermitteln. Dazu kann z. B. der einfache Ansatz

$$\Delta S(i) = g \cdot \Delta t(i) / t_x(i) \quad (4)$$

gewählt werden. Darin bedeutet  $g$  eine Größe, die empirisch bestimmt wird und die von der Höhe der werkstoffbedingten Abweichung des Härteergebnisses eines unkorrigierten Zyklus  $n = u$  gegenüber dem Härteergebnis des Referenzzyklus  $n = b$  abhängt. Wird als Härteergebnis beispielsweise die Randhärte  $R_{ht}$  verstanden, entspricht die Abweichung der Härteergebnisse der Differenz

$$\Delta R_{ht}(u) = R_{ht}(b) - R_{ht}(u). \quad (5)$$

Darin bedeuten:  $R_{ht}(b)$  — die erwünschte und im Referenzzyklus  $n = b$  erzielte Randhärte;  $R_{ht}(u)$  — die im unkorrigierten Zyklus  $n = u$  erzielte, wegen veränderter Härtebarkeitseigenschaften jedoch vom erwünschten Wert abweichende Randhärte.

In einem oder mehreren Anpassungsschritten bzw. mit Hilfe einer entsprechenden Anzahl von Versuchshärtungen und unter Ermittlung des jeweiligen Betrages des Ausdrucks (1) sowie unter Durchführung einer Korrektur des Prozeßablaufes in der beschriebenen Weise, wird nun  $g$  im Ansatz (4) sukzessive so verändert, daß der Differenzbetrag (5) gegen Null strebt. Der auf diese Weise empirisch ermittelte Wert von  $g$ , wird dann in die zur werkstoffabhängigen Prozeßregelung bzw. Prozeßkorrektur in der Serienfertigung verwendete Beziehung (4) übernommen.

Ein weiteres Beispiel für ein Kriterium zur Erkennung eines charakteristischen Unterschiedes zwischen den Funktionen  $P_i(t)$  und  $P_b(t)$ , das erfindungsgemäß für eine Prozeßregelung in Echtzeit verwendet werden kann, ist die Berechnung des Verhältnisses (Fig. 4)

$$\text{Kappa}(i) = \Delta P(b) / \Delta P(i). \quad (6)$$

durch den Rechner 7. Führt das Ergebnis der Rechnung (6) zu

$$\text{Kappa}(i) \neq 1, \quad (7)$$

bedeutet dies, wie im Zusammenhang mit (2) schon erläutert, daß das im Zyklus  $n = i$  erwärmte Werkstück gegenüber dem im Zyklus  $n = b$  erwärmten, abweichende Werkstoffeigenschaften aufweist.

Analog zur Vorgangsweise, die im Zusammenhang mit der Verwendung des Kriteriums (1) beschrieben wurde, wird der ermittelte Betrag (7) mit Hilfe einer neuen Bestimmungsgleichung

$$\Delta S(i) = k \cdot (1 - \text{Kappa}(i)) \quad (8)$$

zur Berechnung der Korrektur der Stellgröße  $S(i)$  verwendet (Fig. 3). Die Größe  $k$  wird auf gleichem Wege bestimmt, wie für  $g$  schon beschrieben.

Kennzeichnend für den Erfindungsgedanken ist, daß sowohl die beschriebenen beiden Analysen zur Erkennung charakteristischer Unterschiede zwischen einer Referenzfunktion und einer aktuellen Funktion als auch weitere Möglichkeiten dazu Kriterien heranziehen, die den Werkstoffeinfluß bereinigt von anderen Einflüssen erfassen.

Für den Erfindungsgedanken ist darüber hinaus kennzeichnend, daß die analysierten Funktionen  $P_b(t)$  und  $P_i(t)$  stellvertretend und jeweils wahlweise, für den zeitlichen Verlauf einer oder mehrerer der genannten elektrischen Kenngrößen  $P$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $\phi$  oder  $f$  stehen.

Erfindungsgemäß ist es von Vorteil, wenn die vergleichende Analyse parallel mehrere der genannten elektrischen Kenngrößen erfaßt. Dadurch ist es nämlich möglich den Erfindungsgedanken auszuweiten.

So ist es zum Beispiel für den Fall, daß die analysierte Funktion  $P_b(t)$  bzw.  $P_i(t)$  den zeitlichen Verlauf der Erwärmungsleistung darstellt allgemein bekannt und physikalisch leicht begründbar, daß dann der Verlauf der Funktion  $P(t)$  sich gegenüber von  $P_b(t)$  auch unter dem Einfluß einer möglicherweise zwischen den Zyklen  $n = b$  und  $n = i$  eingetretenen Veränderung des Induktorzustandes ändert, wobei hier unter Induktorzustand beides, sowohl der Abnutzungsgrad als auch die räumliche Zustellung des Induktors zum Werkstück verstanden wird.

Ein solcher Einfluß berührt erfindungsgemäß und wie oben erläutert, den werkstoffbedingten und den zur Prozeßreglung herabgezogenen charakteristischen Unterschied nicht und wird daher von der bisher erwähnten Analyse auch nicht erfaßt. Werden nun hingegen erfindungsgemäß, und wie oben erwähnt, mehrere der genannten elektrischen Kenngrößen gleichzeitig bzw. parallel analysiert, kann auch eine Veränderung des Induktorzustandes erfaßt und für die Prozeßsteuerung genutzt werden.

Ein Beispiel für eine solche zusätzliche Erfassung einer Veränderung des Induktorzustandes wird in Verbindung mit Fig. 5 gegeben.

Eine Kontrollzeit  $t_u$  wird so gewählt, daß der Unterschied

$$\text{Lambda}(i) = (P_i(t_u) - P_b(t_u)) / P_b(t_u), \quad (9)$$

und damit gleichzeitig auch der Werkstoffeinfluß noch vernachlässigbar klein sind. Eine solche Bedingung ist

erfahrungsgemäß gegeben, wenn

$$t_u < 0,05 \cdot t_e \quad (10)$$

5 ist.

Der Rechner 7 ermittelt nun für den Zeitpunkt  $t_u$  die momentanen Werte Paare  $(U_b(t_u), I_b(t_u))$  und  $(U_i(t_u), I_i(t_u))$  und daraus die Verhältnisse

$$10 \quad Z(b) = U_b(t_u) / I_b(t_u) \quad (11)$$

und

$$Z(i) = U_i(t_u) / I_i(t_u). \quad (12)$$

15

Die Ausdrücke (11) und (12) stehen bekanntlich für die Impedanzen der betrachteten elektrischen Lasten, in diesem Fall der Systeme Induktor/Werkstück in den Zyklen  $n = b$  und  $n = i$ .

Aus dem Betrag

$$\text{Zeta}(i) = (Z(i) - Z(b)) / Z(b) \quad (13)$$

läßt sich quantitativ und vom Werkstoffeinfluß bereinigt, die Veränderung des Induktorzustandes erfassen und für eine eventuell erforderliche Korrektur der Stellgröße  $S(i)$  verwenden.

Eine solche Korrektur  $\Delta S(i)$ , Fig. 3, wird prinzipiell in gleicher Weise durchgeführt, wie im Zusammenhang mit (4) und (8) schon erläutert, allerdings schon am Anfang des kotnrollierten Zyklus und erheblich vor den entsprechenden Zeitpunkten  $t_i(b)$  bzw.  $t_i(i)$  in Fig. 2, nämlich zum Zeitpunkt

$$35 \quad t_u \ll t_i(b). \quad (14)$$

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur werkstoffabhängigen Steuerung von Wärmebehandlungsprozessen von Metallen bei induktiver Erwärmung in einem geschlossenen Regelkreis, wenn sonst bei vorgegebenen und genau reproduzierten Maschinenparametern das Bearbeitungsergebnis von den einer Zufallsänderung unterliegenden Werkstoffeigenschaften beeinflusst wird, insbesondere durch zufällige Veränderungen des metallurgischen Umwandlungsverhaltens, der elektrischen oder magnetischen Eigenschaften und ähnliches, **dadurch gekennzeichnet**, daß die zeitliche Veränderung der maßgeblichen Prozeßkenngröße oder Prozeßkenngrößen (Temperatur, Erwärmungsleistung und ähnliche Größen), in Echtzeit und in bezug auf die Abweichung gegenüber einer vorgegebenen Funktion analysiert wird, daß daraus die abweichenden Werkstoffeigenschaften erkannt werden und die eventuell notwendige Korrektur dieser maßgeblichen Kenngröße im noch laufenden Arbeitszyklus dergestalt vorgenommen wird, daß die zufällige Veränderung der Werkstoffeigenschaften jeweils kompensiert und deren Einfluß auf das Bearbeitungsergebnis eingeschränkt wird.

2. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß sie zusammengesetzt ist aus Meßwandlern (1, 2) zur kontinuierlichen Messung der elektrischen Prozeßkenngrößen Leistung  $P$ , Spannung  $U$ , Strom  $I$ , Phasenwinkel  $\phi$  und Frequenz  $f$ , die mittelbar die Rück-

wirkung des Werkstückes (3) auf den als Leistungsquelle fungierenden Frequenzwandler (4) und auf den von letzterem eingespeisten Induktor (5) beschreiben, einem mehrkanaligen Signalwandler (6), der die Meßsignale von den genannten Meßwandlern (1, 2) verarbeitet und an einem Rechner (7) weitergibt, der in Verbindung mit einem gespeicherten Vorrat von beliebigen Referenzfunktionen, die genannten Prozeßkenngrößen in bezug auf eventuelle Abweichungen gegenüber den Referenzfunktionen in Echtzeit analysiert und in Abhängigkeit vom Ergebnis der Analyse und aufgrund einer entsprechenden Umrechnung noch vor Ende des Prozeßablaufes den Prozeß durch Änderung der Stellgröße in einer Steuerung (8) dergestalt weiterführt, daß das auf das Werkstück (3) bezogene Wärmebehandlungsergebnis trotz unvorhergesehener und zufällig veränderter Werkstoffeigenschaften den vorgegebenen Vorschriften entspricht.

3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die genannten Komponenten (1—8) gemäß dem bekannten Prinzip eines geschlossenen Regelkreises miteinander verknüpft sind.

4. Vorrichtung nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß der genannte Regelkreis unmittelbar auch das individuelle, möglicherweise sich zufallsartig verändernde Behandlungsverhalten des Werkstückes (3) enthält.

5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2—4, dadurch gekennzeichnet, daß die vom Signalwandler (6) empfangenen Meßsignale vom Rechner (7) in Echtzeit analysiert und mit einer im eigenen Speicher enthaltenen Vorrat von werkstoff- und werkstückspezifischen Funktionen vergleicht und in Abhängigkeit von der Höhe von eventuell festgestellten momentanen Abweichungen und mit Hilfe eines Rechenprogramms, das die geometrischen, physikalischen, elektrischen und metallurgischen Gesetzmäßigkeiten des jeweils bearbeiteten Werkstückes bzw. Werkstoffes berücksichtigt, die Korrekturen berechnet, die eventuell notwendig sind, um mit Hilfe der Steuerungsvorrichtung (8), des Frequenzwandlers (4) und des Induktors (5) den Erwärmungsprozeß des Werkstückes (3) so zu steuern, daß eventuell zufällig auftretende Änderungen der Werkstoffeigenschaften des bearbeiteten Werkstückes (3) kompensiert und damit deren sonst störenden Einflüsse auf das Bearbeitungsergebnis ausgeschaltet oder zumindestens vermindert werden.

6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2—5, dadurch gekennzeichnet, daß die zeitliche Veränderung der jeweils erfaßten werkstoffabhängigen Prozeßkenngrößen Leistung  $P$ , Spannung  $U$ , Strom  $I$ , Phasenwinkel  $\phi$  oder Frequenz  $f$ , mit Hilfe des Rechners aufgrund freiwählbarer Kriterien analysiert werden kann.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

60

65

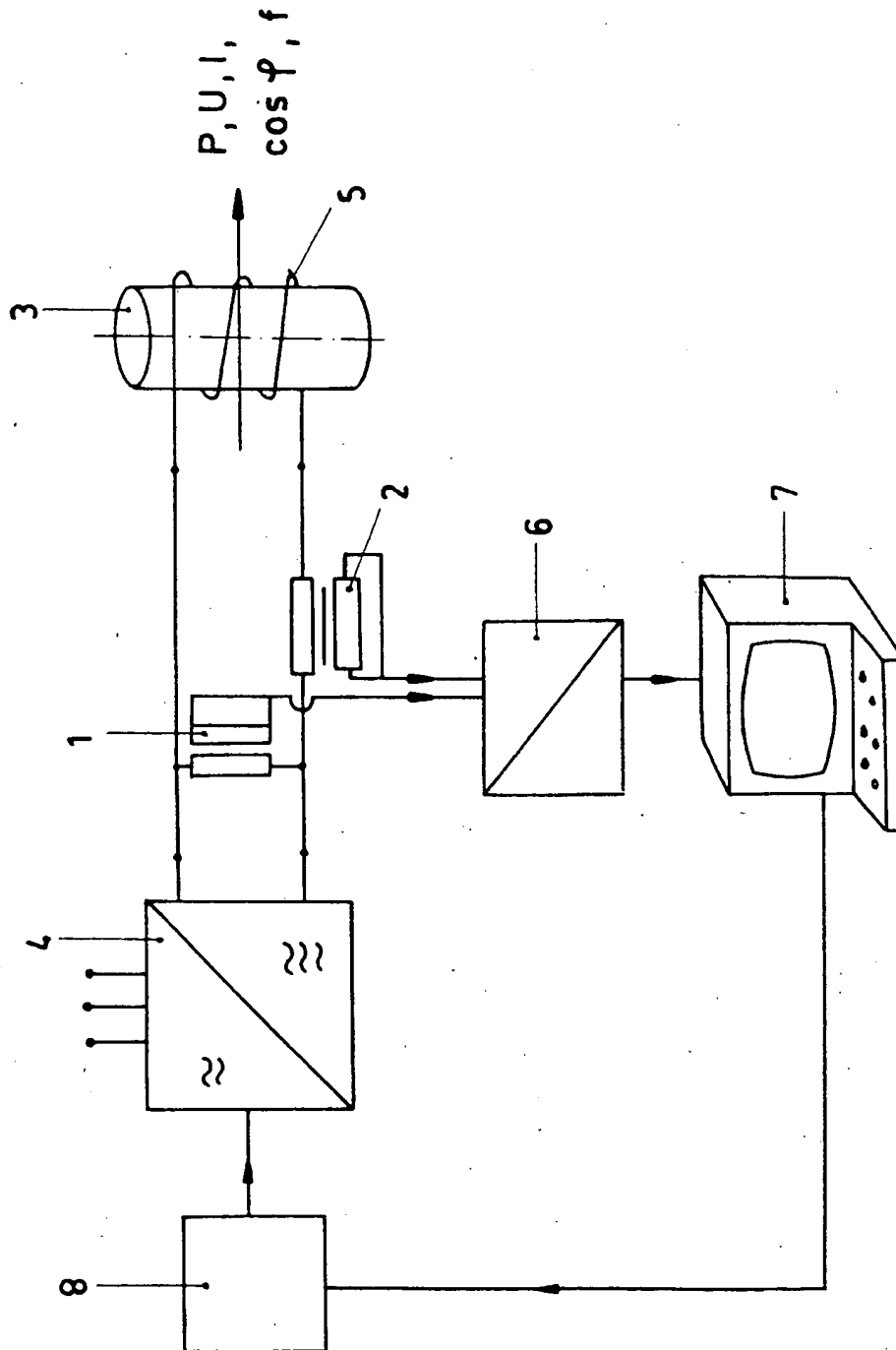
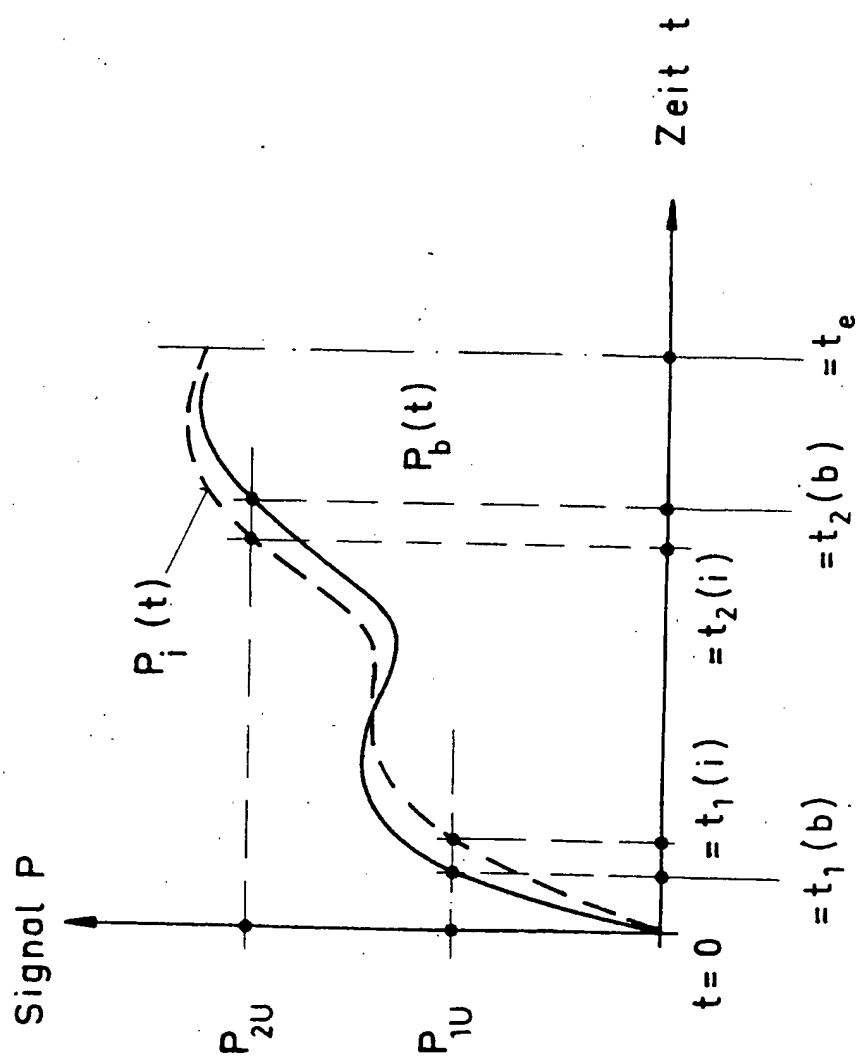


FIG. 1



**FIG. 2**



Signal P  
Stellgröße S

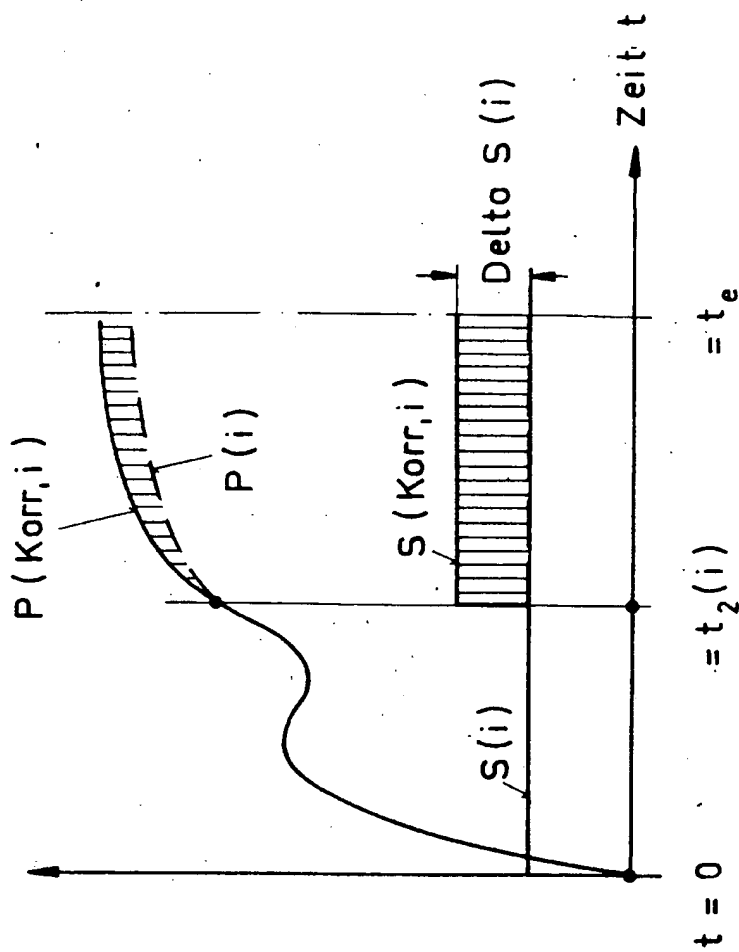


FIG. 3

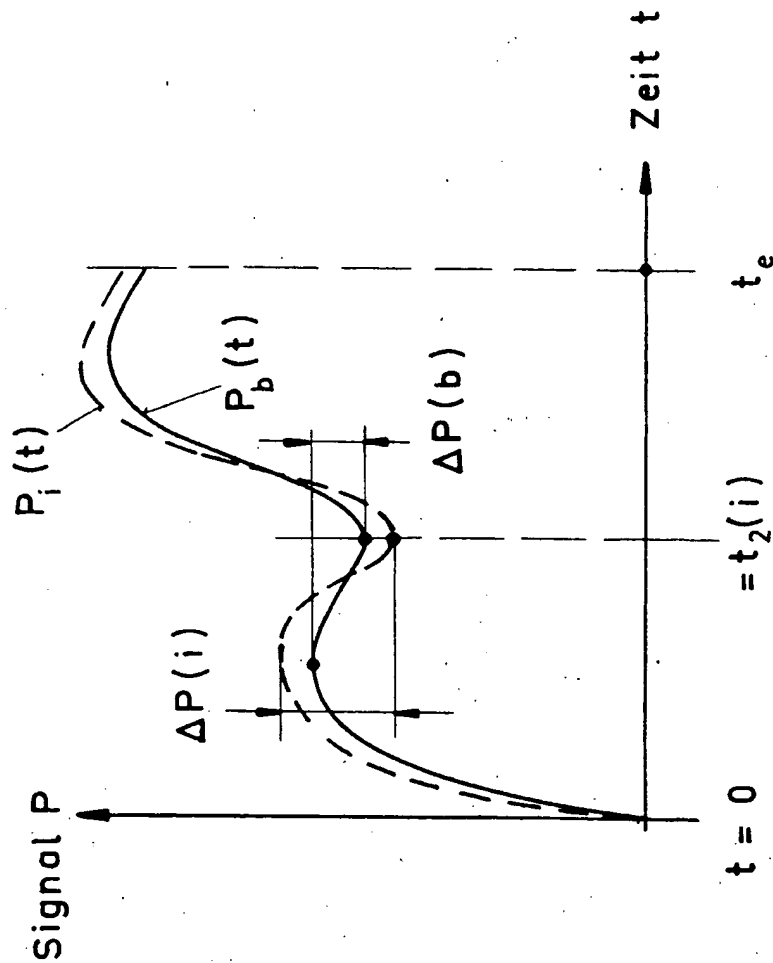


FIG. 4

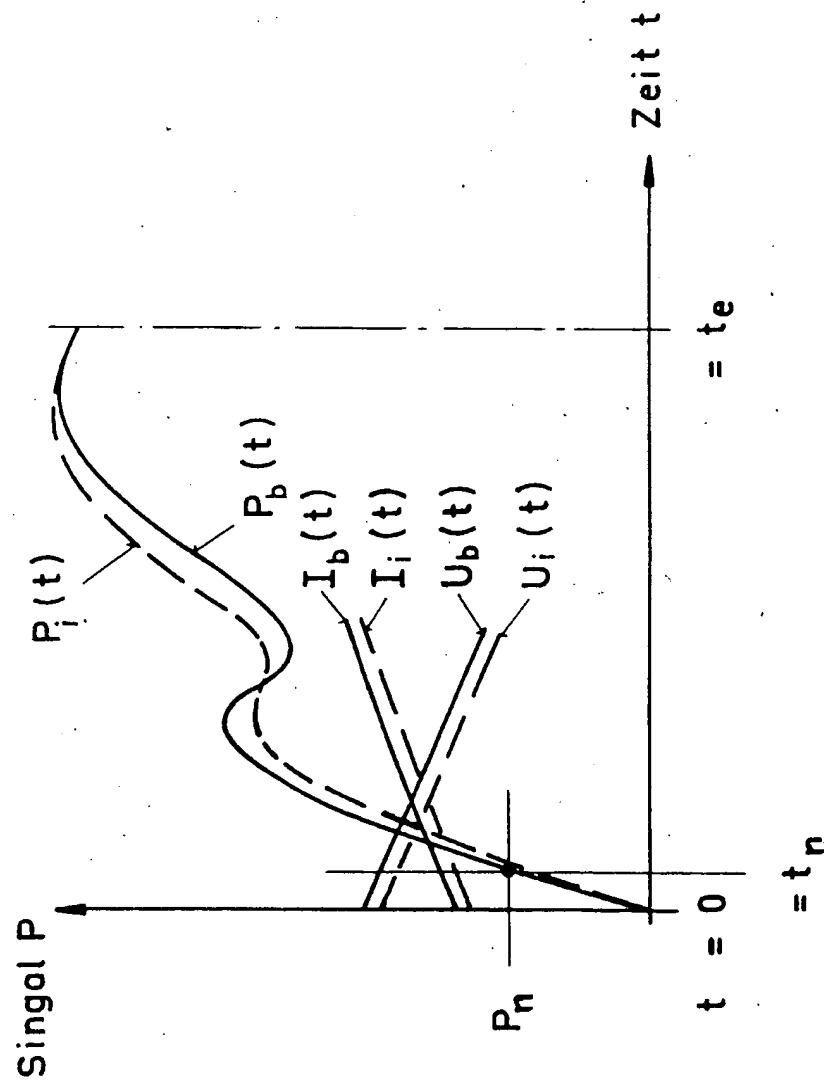


FIG. 5